МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 681.523

А.Т. РЫБАК

ГИДРОПНЕВМОАККУМУЛЯТОР КАК ЭЛЕМЕНТ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И ЕГО ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Приводится методика динамического расчёта гидравлических систем, предлагается вывод динамической модели гидропневмоаккумулятора и его приведённой объёмной жёсткости.

Ключевые слова: *гидропневмоаккумулятор, гидромеханическая система, динамика, моделирование, объёмная жёсткость.*

Постановка задачи. Задача предварительного расчёта динамики оборудования на стадии его проектирования весьма актуальна. Особенно важен предварительный расчёт для приводов быстродействующих механизмов, время переходных процессов в рабочем цикле которых составляет существенную часть. Точность результатов динамического расчёта, а следовательно, и его положительный эффект во многом определяются выбором метода расчёта.

Ранее нами рассмотрена методика моделирования гидромеханической системы, согласно которой определение изменения давления в различных точках гидросистемы осуществляется с использованием приведённой объёмной жёсткости [1]. В соответствии с этой методикой определение изменения давления в любой точке гидравлической системы при её работе в динамическом режиме осуществляется по формуле:

$$\frac{dp}{dt} = C_{пр}(\Sigma Q_{вх} + \Sigma Q_{вых}), \qquad (1)$$

где p – давление рабочей жидкости на рассматриваемом участке гидросистемы; $Q_{вх}$ и $Q_{вых}$ – расходы рабочей жидкости, входящей в рассматриваемый участок и выходящей из него соответственно; $C_{пр}$ – приведённая объёмная жёсткость рассматриваемого участка гидросистемы; t – время процесса.

Там же [1] предложены полученные аналитически формулы для определения приведённых объёмных жёсткостей различных элементов гидросистемы. Однако в [1] мы ограничились рассмотрением лишь тех элементов, объём которых целиком заполнен рабочей жидкостью. А как же быть, если рабочее тело, заполняющее рассматриваемый объём, неоднородно. Для ответа на поставленный вопрос рассмотрим работу гидропневмоаккумулятора (рис.1) и определим его объёмную жёсткость.

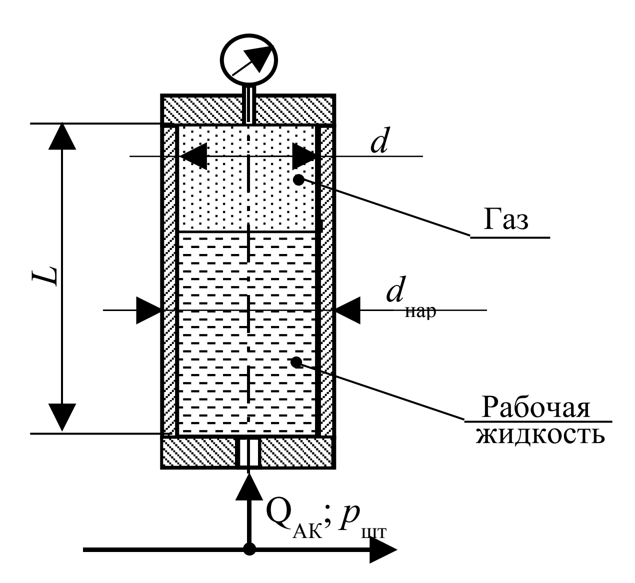


Рис. 1. Расчётная схема гидропневмоаккумулятора

Объёмная жёсткость рабочей полости гидропневмоаккумулятора. Принимая процесс изменения состояния газа, заполняющего рабочий объём гидропневмоаккумулятора, адиабатическим, можно записать уравнение, описывающее состояние газа

$$pv^k = \text{Const}\,, \qquad (2)$$

где p, v и k – давление, удельный объём и показатель адиабаты газа соответственно.

Произведя дифференцирование уравнения (2), получим

$$dp \cdot v^k + kpv^{k-1}dv = 0\,,$$

но тогда

$$dp = -\frac{kp}{v}dv\,. \qquad (3)$$

Имея в виду, что удельный объём газа представляет собой объём единицы массы газа

$$v = \frac{V_{\Gamma}}{m}\,,$$

а масса газа в рабочей полости гидропневмоаккумулятора постоянна, уравнение (3) запишем в виде

$$dp = -\frac{kp}{V_{\Gamma}}dV_{\Gamma}\,,$$

или, обозначив объемную жёсткость газа через

$$C_{\Gamma} = \frac{kp}{V_{\Gamma}}\,, \qquad (4)$$

получим уравнение

$$dp = -C_{Г} \cdot dV_{Г} ,$$

знак минус в котором указывает на то, что положительному приращению объёма газа, заполняющего рабочую полость гидропневмоаккумулятора, соответствует отрицательное приращение его давления.

При функционировании гидропневмоаккумулятора в его рабочей полости, помимо газа, присутствует и рабочая жидкость, объёмная жёсткость которой определяется по формуле [1]:

$$C_{Ж} = \frac{E_{Ж}}{V_{Ж}} , \qquad (5)$$

где $E_{Ж}$ и $V_{Ж}$ – модуль упругости рабочей жидкости и занимаемый ею объём рабочей полости гидропневмоаккумулятора соответственно.

Приведённую объёмную жёсткость рабочей полости гидропневмоаккумулятора, считая корпус абсолютно жёстким, определим по формуле [1]

$$C_{пр} = \frac{\prod_{i=1}^{n} C_i}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{C_i}\left(\prod_{i=1}^{n} C_i\right)} , \qquad (6)$$

где $C_{пр}$ – приведённая объёмная жёсткость системы из n гидравлических элементов; C_i – приведённая объёмная жёсткость i-го элемента.

Для рассматриваемого случая уравнение (6) примет вид

$$C_{ГЖ} = \frac{C_{Г} C_{ж}}{C_{Г} + C_{ж}} ,$$

а после преобразований с учётом (4) и (5) получим

$$C_{ГЖ} = \frac{E_{ж}}{V_{Ж} + \frac{E_{ж}}{kp_{АК}} V_{Г}} . \qquad (7)$$

Произведём преобразование уравнения (7), имея в виду, что

$$V_0 = V_{Ж} + V_{Г} , \qquad (8)$$

где V_0 – полный объём рабочей полости гидропневмоаккумулятора (без учёта объёма разделителя).

Объём жидкости, находящейся в рабочей полости гидропневмоаккумулятора, определим из уравнения (8), с этой целью уравнение изменения состояния газа (2) запишем в виде

$$p_0 V_0^k = p_{АК} V_{Г}^k , \qquad (9)$$

где p_0 – давление газа при зарядке гидропневмоаккумулятора; $p_{АК}$ – текущее значение давления рабочей жидкости в рабочей полости гидропневмоаккумулятора.

Из уравнения (9) следует,

$$V_Г = V_0 \left(\frac{p_0}{p_{АК}} \right)^{\frac{1}{k}}. \qquad (10)$$

Выразив объём рабочей жидкости из уравнения (8) с учётом (10) и подставив его в уравнение (7), после преобразований получим

$$C_{ГЖ} = \frac{E_ж}{V_0 \left[1 - \left(\frac{p_0}{p_{АК}} \right)^{\frac{1}{k}} + \frac{E_ж}{k p_{АК}} \left(\frac{p_0}{p_{АК}} \right)^{\frac{1}{k}} \right]}. \qquad (11)$$

Уравнение (11) позволяет определить приведённую объёмную жёсткость гидропневмоаккумулятора при условии, что его корпус представляет собой абсолютно жёсткую конструкцию. Если же влиянием деформации корпуса гидропневмоаккумулятора принебречь нельзя, то уравнение (11) при расчёте приведённой объёмной жёсткости будет давать значительную погрешность.

Влияние деформации корпуса гидропневмоаккумулятора на его приведённую объемную жёсткость. Влияние деформации корпуса на объёмную жёсткость рассмотрим на примере наиболее распространенного в настоящее время гидропневмоаккумулятора поршневого типа (см. рис.1). Под действием давления внутри рабочей полости корпус гидропневмоаккумулятора растягивается по образующей и раздувается в радиальном направлении. Приняв давление во всей рабочей полости гидропневмоаккумулятора одинаковым, силу, растягивающую корпус вдоль образующей, определим по уравнению

$$F = f_{АК} \cdot p_{АК}, \qquad (12)$$

при этом удлинение корпуса найдем из выражения

$$F = \left(L - L_0 \right) \cdot \frac{E_{ст}}{L_0} f_{ст}, \qquad (13)$$

где $f_{АК}$ – площадь поперечного сечения рабочей полости гидропневмоаккумулятора; L и L_0 – текущее и начальное значения длины рабочей полости гидропневмоаккумулятора; $E_{ст}$ – модуль упругости материала стенки; $f_{ст}$ – площадь поперечного сечения стенки корпуса.

С учётом (12) и (13) можно записать уравнение для определения давления в рабочей полости гидропневмоаккумулятора

$$p_{АК} = \left(L - L_0 \right) \cdot \frac{E_{ст}}{L_0} \cdot \frac{f_{ст}}{f_{АК}},$$

продифференцировав которое и произведя преобразования его правой части, имеем

$$dp_{\text{АК}} = dV \cdot \frac{E_{\text{ст}}}{V_0} \cdot \frac{f_{\text{ст}}}{f_{\text{АК}}}. \qquad (14)$$

Таким образом, объёмная жёсткость корпуса гидропневмоаккумулятора, вызываемая изменением его длины, определяется коэффициентом

$$C_{\text{L}} = \frac{E_{\text{ст}}}{V_0} \cdot \frac{f_{\text{ст}}}{f_{\text{АК}}}. \qquad (15)$$

Объёмная жёсткость корпуса поршневого гидропневмоаккумулятора, вызываемая изменением его радиуса, может быть рассчитана по формуле объёмной жёсткости цилиндрической стенки [1]

$$C_{\text{стАК}} = \frac{4E_{\text{ст}}}{\pi d^3 \dfrac{L_0}{\delta}}$$

или после преобразования

$$C_{\text{стАК}} = \frac{E_{\text{ст}}}{V_0 \dfrac{d}{\delta}}, \qquad (16)$$

где d и δ – внутренний диаметр и толщина стенки корпуса гидропневмоаккумулятора.

Приведённую объёмную жёсткость корпуса гидропневмоаккумулятора поршневого типа определим по формуле (6), в результате получим формулу

$$C_{\text{корп}} = \frac{C_{\text{L}} C_{\text{стАК}}}{C_{\text{L}} + C_{\text{стАК}}},$$

которая после преобразования с учётом (15) и (16) примет вид

$$C_{\text{корп}} = \frac{E_{\text{ст}}}{V_0 \left(\dfrac{2}{\bar{d} - 1} + \dfrac{1}{\bar{d}^2 - 1} \right)}, \qquad (17)$$

где $\bar{d} = \dfrac{d_{\text{нар}}}{d}$ – наружный диаметр стенки корпуса гидропневмоаккумулятора, отнесённый к её внутреннему диаметру.

Полную приведённую объёмную жёсткость гидропневмоаккумулятора поршневого типа определим по уравнению (6) с учётом (16) и (17)

$$C_{\text{АК}} = \frac{C_{\text{ГЖ}} C_{\text{корп}}}{C_{\text{ГЖ}} + C_{\text{корп}}}. \qquad (18)$$

Расчёт динамики гидропневмоаккумулятора. Зная приведённую объёмную жёсткость гидропневмоаккумулятора, можно определить изменение давления в его рабочей полости по уравнению (1), которое с учётом знаков для гидропневмоаккумулятора примет вид

$$dp_{\text{АК}} = C_{\text{АК}} \cdot Q_{\text{АК}} \cdot dt, \qquad (19)$$

где $Q_{\text{АК}}$ – расход рабочей жидкости, входящей в рабочую полость гидропневмоаккумулятора.

Расход рабочей жидкости, входящей в рабочую полость гидропневмоаккумулятора, определим по расходной формуле, считая, что вход аккумулятора представляет собой штуцер, выполненный в виде цилиндрической насадки

$$Q_{\text{АК}} = \mu_{\text{шт}} f_{\text{шт}} \sqrt{\frac{2}{\rho_{\text{ж}}}\left(p_{\text{шт}} - p_{\text{АК}}\right)}\,, \qquad (20)$$

где $\mu_{\text{шт}}$ и $f_{\text{шт}}$ – коэффициент расхода и площадь живого сечения штуцера соответственно; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность рабочей жидкости; $p_{\text{шт}}$ – давление рабочей жидкости на входе в штуцер.

Выводы. Очевидно, что дифференциальное уравнение (19), описывающее изменение рабочего давления гидропневмоаккумулятора, нелинейно, так как согласно ему приращение давления в рабочей полости является функцией расхода через входной штуцер гидропневмоаккумулятора и его приведённой объёмной жёсткости, которые в свою очередь с учётом (20) и (11) зависят от давления в рабочей полости гидропневмоаккумулятора и к тому же нелинейно. В связи с нелинейностью уравнение (19) целесообразно интегрировать, используя численные методы, что даёт возможность без существенных погрешностей отслеживать изменение давления в рабочей полости гидропневмоаккумулятора и расход рабочей жидкости на его входе в реальном масштабе времени.

Библиографический список

1. Рыбак А.Т. Моделирование и расчет гидромеханических систем на стадии проектирования: Монография. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2006. – 167 с.

Материал поступил в редакцию 18.12.06.

A.T. RYBAK

HYDRAULIC BATTERY AS ELEMENT OF THE HYDRAULIC-MECHANICAL SYSTEM AND ITS DYNAMIC MODEL

It is given to information on methods dynamic calculation hydraulic systems, is offered conclusion to dynamic model of the hydraulic battery with pneumatic spring and its brought three-dementional acerbity.

РЫБАК Александр Тимофеевич (р. 1953), доцент (1997) кафедры «Гидравлика, гидропневмоавтоматика и тепловые процессы», кандидат технических наук (1990), докторант (2005) кафедры «Теоретическая механика» Донского государственного технического университета. Окончил РИСХМ (1979) по специальности «Приборы точной механики».
Научные интересы связаны с исследованием динамики гидромеханических систем и их элементов.

Имеет более 70 научных трудов, в том числе 18 авторских свидетельств СССР и патенты РФ.